

Mitteilung des Instituts
für Grundbau und Bodenmechanik
Technische Universität

Heft Nr. 48



ZUR ERMITTLUNG VON PFAHLTRAGFÄHIGKEITEN NACH EC 7 UND DIN 1054 TEIL 100

H.-G. Kempfert

Pfahl-Symposium '95

Fachseminar: 23./24. Februar 1995

Zusammengestellt von

U. Ernst
B. Wienholz

Braunschweig 1995

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. W. Rodatz

1 EINLEITUNG

Mit der Verabschiedung der europäischen geotechnischen Entwurfsnorm ENV 1997-1 (EC 7) sind auch im nationalen Bereich Veränderungen in der Entwurfs- und Bemessungspraxis verbunden. Die zwischenzeitlich weitgehend bearbeiteten neuen nationalen Normen DIN 1054, DIN 4017, DIN 4019, DIN 4084, DIN 4085, jeweils Teil 100, stellen den nationalen Anhang zum EC 7 dar. Damit sollen bestimmte nationale Auffassungen bzw. Schutzziele in der Anwendung gesichert sein. Zwischen EC 7 und den nationalen Normen Teil 100 der Geotechnik ist das deutsche nationale Anwendungsdokument (NAD) zwischengeschaltet, siehe Bild 1. Die grundlegenden Einwirkungen und die dabei zu verwendenden Teilsicherheitsbeiwerte finden sich in ENV 1991-1 (EC 1) und wurden zwischenzeitlich auch mit ENV 1997-1 (EC 7) abgestimmt.

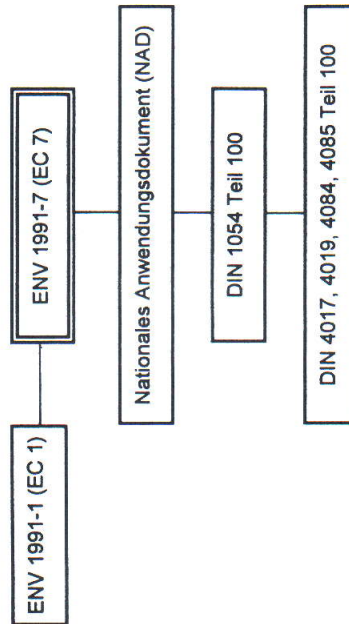


Bild 1: Nationale Normenorganisation auf der Grundlage der ENV 1997-1 (EC 7)

Die Ermittlung von Pfahltragfähigkeiten kann national unmittelbar ausgehend vom EC 7 mit der DIN 1054 Teil 100 vorgenommen werden in die die bisherigen Regelungen zu den Pfahltragfähigkeiten aus DIN 1054, DIN 4014, DIN 4026 und DIN 4128 eingegangen sind. Die Pfahlausführung wird in Zukunft durch europäische Ausführungsnormen für Spezialtiefbau geregelt. Die entsprechende Bohrpfahlnorm liegt bereits in Entwurf als ENV 1536 vor.

2 GRUNDSÄTZE DER SICHERHEITSNACHWEISE

2.1 Grenzzustände und Grenzzustandsgleichungen

Im Standsicherheitsnachweis ist nachzuweisen, daß eine ausreichende Sicherheit gegen Versagen des Bauteils/Bauwerks gegeben ist, wenn die Bedingung

$$R_d - S_d \geq 0 \quad (1)$$

erfüllt ist. Gleichung (1) wird als Grenzzustandsgleichung bezeichnet und enthält die Größen

S_d Bemessungswert (design value; Index d) der Einwirkungen

R_d Bemessungswert (Index d) der Widerstände

für die jeweiligen Grenzzustände der Tragfähigkeit (GZ 1) und der Gebrauchstauglichkeit (GZ 2).

Der Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZ 1) unterscheidet drei Arten der Versagenszustände, um eine gewisse Übereinstimmung zwischen dem konstruktiven Ingenieurbau und dem Grundbau zu erreichen, die mit 1A, 1B und 1C bezeichnet werden. Die unterschiedlichen Auffassungen nach EC 7 und DIN 1054 Teil 100 zeigt Bild 2.

2.2 Einwirkungen bei Pfahlgründungen

Die charakteristischen Werte der Einwirkungen S_k werden zu Bemessungswerten S_d durch Multiplikation mit Teilsicherheitsbeiwerten γ_i . Die für die Ermittlung von Pfahltragfähigkeiten maßgeblichen Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen zeigt Tabelle 1.

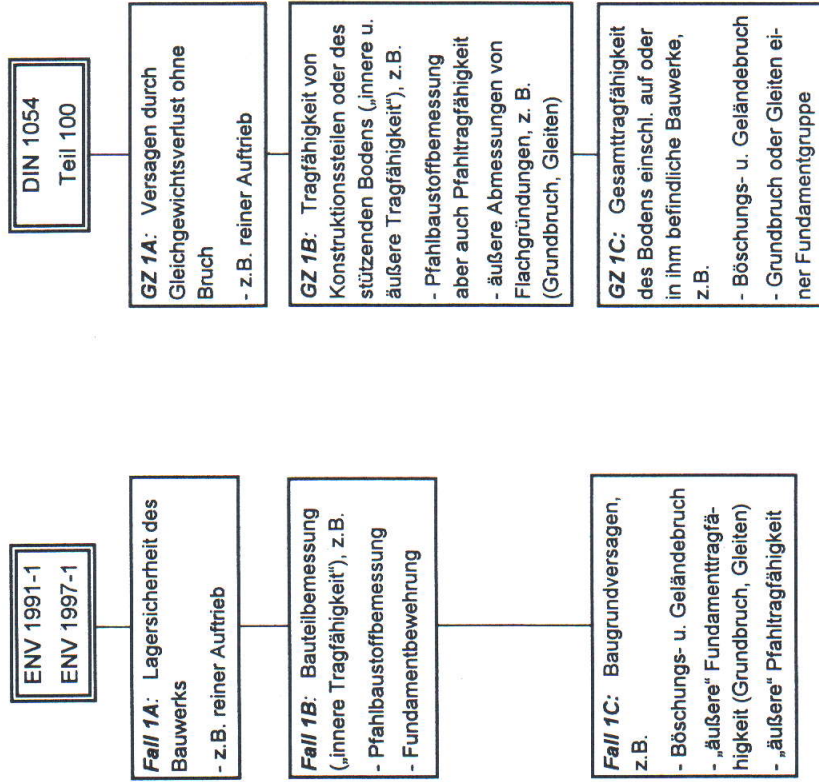


Bild 2: Unterschiedliche Definitionen nach ENV 1991/1997 und DIN 1054 Teil 100 zu den Nachweisfällen der Grenzzustände der Tragfähigkeit (GZ 1)

In DIN 1054 Teil 100 finden sich für den rechten Teil der Tabelle 1 noch zusätzlich zwei Spalten für die Lastfälle 2 und 3 (Lastkombinationen). Endgültige Festlegungen dazu sind aber noch zu treffen sowie einer Abstimmung mit den Tragwerksplanern zu erreichen. Einwirkungen S setzen sich aus den Einwirkungen des Bauwerks (Gründungslasten) und den Einwirkungen des Baugrundes (z.B. negative Mantelreibung, Seitendruck, usw.).

Fall bzw. GZ	ENV 1991/1997		DIN 1054 Teil 100	
	Symbol	DV ¹⁾	Symbol	LF1
1B ständige Einwirkungen - ungünstig - günstig Flüssigkeitsdruck veränderliche Einwirkungen - ungünstig - günstig Seitendruck, ständig Mantelreibung, ständig Erddruck, ständig Erddruck, veränderlich	γ_{Gsup}	1,35	γ_{Gsup}	1,35
	γ_{Ginf}	1,00	γ_{Ginf}	1,00
	γ_F		γ_F	1,35
	γ_Q	1,50	γ_{Qsup}	1,50
			γ_{Qinf}	0
			γ_H	1,35
			γ_M	1,35
			γ_{Eg}	1,35
			γ_{Eq}	1,50
	1C ständige Einwirkungen - ungünstig - günstig Flüssigkeitsdruck veränderliche Einwirkungen - ungünstig - günstig Seitendruck, ständig Mantelreibung, ständig	γ_G	1,00	γ_G
γ_G		1,00	γ_F	1,00
γ_Q		1,30	γ_{Gsup}	1,30
			γ_{Ginf}	0
			γ_H	1,0
			γ_M	1,0

¹⁾ D = dauernd, V = vorübergehend

Tabelle 1: Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen die für Pfahlgründungen von Bedeutung sind

2.3 Widerstände bei Pfahlgründungen

Da in ENV 1997-1 (EC 7) und DIN 1054 Teil 100 sehr unterschiedliche Konzepte der Pfahltragfähigkeit ermittelt wurden, lassen sich die Widerstände bei Pfahlgründungen nicht ohne weiteres generell gegenüberstellen, sondern werden in Abschnitt 3 und 4 einschließlich der anzusetzenden Teilsicherheitsbeiwerte beispielhaft aufgeführt.

3 AXIALE PFAHLWIDERSTÄNDE

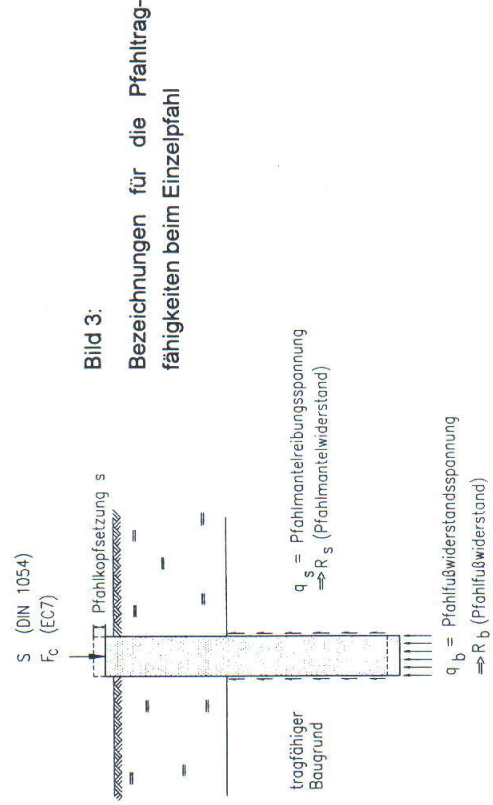
3.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

ENV 1997-1 (EC 7) gibt für die Ermittlung der axialen Pfahlwiderstände (Einzelpfähle) folgende drei Möglichkeiten an:

- a) Aufgrund von statischen Pfahlprobebelastungen,
- b) mit empirischen oder analytischen Berechnungsverfahren deren Zuverlässigkeit durch statische Probebelastungen unter vergleichbaren Umständen nachgewiesen ist,
- c) durch dynamische Probebelastungen, die wie b) durch Prüfung mit statischen Versuchen abgesichert sind.

DIN 1054 Teil 100 geht analog zu den o.g. Punkten a) bis c) nach EC 7 vor, gibt aber für Standardfälle nach b) detaillierte Angaben zum Pfahlfußwiderstand R_b und Pfahlmantelwiderstand R_s auf die Grundlage der bisherigen Angaben in DIN 4014 (Bohrpfähle) und DIN 4128 (Verpresspfähle). Für Verdängungspfähle wurden die Tragfähigkeitstabellen der DIN 4026 (Ramppfähle) sowie die durch ein neueres Forschungsvorhaben (FRANKE, 1991) weitgehend abgesicherten Tabellenwerte von (SCHENK, 1966) verwendet. Ein analytisches Berechnungsverfahren wird in DIN 1054 Teil 100 nicht zugelassen.

Nachfolgend sind nur beispielhaft axiale Pfahldruckkräfte für den Einzelpfahl behandelt, wobei die Bezeichnungen nach Bild 3 für den Einzelpfahl berücksichtigt sind.



3.2 ENV 1997-1 (EC 7)

3.2.1 Nachweis der Tragfähigkeit

Gleichung (1) lautet im Pfahlteil von EC 7

$$F_{cd} \leq R_{cd} \tag{2}$$

mit

F_{cd} = Bemessungswert des Grenzzustandes der axialen Pfahldruckkraft (Einwirkung)
 R_{cd} = Summe aller Komponenten der Bemessungswiderstände im Grenzzustand der Pfahlgründung gegen axiale Lasten.

Dabei ist nochmals darauf hinzuweisen, daß die „äußere Pfahltragfähigkeit“ in EC 7 nach Fall 1C zu bestimmen ist. Im einzelnen ist gemäß Abschn. 3.2.2 oder 3.2.3 vorzugehen.

3.2.1 Druckfahlwiderstände aus Pfahlprobelastungen

Der charakteristische Druckfahlwiderstand R_{ck} ermittelt sich nach Tabelle 2 und Gleichung (3).

Anzahl der Probelastungen	1	2	> 2
a) ξ bezogen auf den Mittelwert von R_{cm}	1,5	1,35	1,3
b) ξ bezogen auf den Kleinstwert von R_{cm}	1,5	1,25	1,1

Tabelle 2: Faktor ξ zur Ermittlung von R_{ck} abhängig von der Anzahl der Probelastungen

$$R_{ck} = \frac{R_{cm}}{\xi} \tag{3}$$

Für die Ableitung des Grenzzustandes des Bemessungswiderstandes der Tragfähigkeit sollte R_{ck} möglichst nach Gleichung (4) in Fußwiderstand R_{bk} und Mantelwiderstand R_{sk}

$$R_{ck} = R_{bk} + R_{sk} \tag{4}$$

unterschiedlicher werden, wobei die Teilsicherheitsbeiwerte nach Tabelle 3 anzuwenden sind.

Teilsicherheitsbeiwerte	γ_b	γ_s	γ_t
Ramm-Verdrängungspfähle	1,3	1,3	1,3
Bohrpfähle	1,6	1,3	1,5
mit durchgehender Schnecke gebohrte Pfähle	1,45	1,3	1,4

Tabelle 3: Teilsicherheitsbeiwerte γ_b (Fußwiderstand), γ_s (Mantelwiderstand) und γ_t (Gesamtwiderstand)

Der Bemessungswert der Tragfähigkeit R_{cd} ermittelt sich nach Gleichung (5) zu

$$R_{cd} = \frac{R_{bk} + R_{sk}}{\gamma_b \cdot \gamma_s} \tag{5}$$

Sofern Fuß- und Mantelwiderstand bei der Pfahlprobelastung nicht getrennt gemessen worden ist

$$R_{cd} = \frac{R_{ck}}{\gamma_t} \tag{6}$$

3.2.3 Druckfahlwiderstände aus Erfahrungswerten

Es gilt Gleichung (5), wobei

$$R_{bk} = q_{bk} \cdot A_b \tag{7a}$$

$$R_{sk} = \sum q_{sk} \cdot A_{sk} \tag{7b}$$

mit

q_{bk} charakteristischer Wert der Pfahlfußwiderstandsspannung

A_b Nennwert der Pfahlfußfläche

q_{sk} charakteristischer Wert der Pfahlmantelreibungsspannung in der Schicht i

A_{sk} Nennwert der Pfahlmantelfläche in der Schicht i

Angaben zu q_{bk} und q_{sk} werden in EC 7 nicht gemacht, nur daß sie aus Korrelationen mit Pfahlprobelastungen abzuleiten sind. Dabei ist sinngemäß vor Anwendung von Gleichung (5) ein Faktor 1,5 als Divisor auf q_{bk} und q_{sk} analog zu Tabelle 2 an-

zuwenden bzw. gleich um den Faktor 1,5 niedrigere charakteristische Werte zu wählen.

3.2.3 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

Beziehen sich die Abschn. 3.2.1 bis 3.2.3 auf den Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit (definitionsgemäß nach Abschn. 2 bei EC 7 auf den Fall 1C für die äußere Pfahltragfähigkeit, so sind für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis nach GZ 2 in EC 7 nur Hinweise enthalten die Pfahlsetzungen abzuschätzen.

3.3 DIN 1054 Teil 100

3.3.1 Nachweis der Tragfähigkeit (GZ 1)

Für den GZ 1B (Bruch im Boden in der Pfahlumgebung) muß die Bedingung

$$R_{i,d} - S_{i,d} \geq 0 \tag{8}$$

erfüllt sein, wobei für die Widerstände des Einzelfahls die Teilsicherheitsbeiwerte nach Tabelle 4 anzusetzen sind

GZ	Widerstand	Formelzeichen	LF 1
1B	Einzelfähle (Druck u. Zug, axial)	γ_{Pa}	1,4

Tabelle 4: Teilsicherheitsbeiwerte für den Bodenwiderstand eines Einzelfahls

Der Bemessungswert des Widerstands des Einzelfahls im GZ 1B („äußere Tragfähigkeit“) ist

$$R_{i,d} = \frac{\eta \cdot R_{i,k}}{\gamma_{Pa}} \tag{9}$$

mit

$$R_{i,k} = R_{s,k}(s_i) + R_{k,k}(s_i) \tag{10}$$

$R_{s,k}$ (Pfahlfußwiderstand), $R_{k,k}$ (Pfahlmantelwiderstand) und s_i (Pfahlkopferschiebung) sowie den Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung von Widerstandseinflüssen

$$\eta = \eta_N \cdot (\text{Anzahl Probelast}) \cdot \eta_Z \text{ (zyklische Einwirkung)} \tag{11}$$

3.3.2 Axiale Pfahlwiderstände aus Pfahlprobelastungsergebnissen

Axiale Pfahlwiderstände sind durch eine Widerstands-Setzungs-Linie (WSL) zu beschreiben, die möglichst aus Pfahlprobelastungen abzuleiten ist. Die in der Pfahlprobelastung ermittelte WSL ist i.d.R. als charakteristische WSL mit $R_k(s)$ ohne Zu- oder Abschläge anzusetzen. Aus dem charakteristischen Pfahlwiderstand R_k ist der Bemessungswiderstand R_d nach Gleichung (9) zu bestimmen. Dabei dürfen Anpassungsfaktoren η verwendet werden.

N Probebelastungen	η_N	
	Druck	Zug
N = 1	1,00	1,00
N = 2	1,10	1,00
R_{mittel}	1,20	1,00
R_{min}	1,15	1,10
R_{min}	1,35	1,20

Tabelle 5: Anpassungsfaktor η_N zur Berücksichtigung der Anzahl der durchgeführten Pfahlprobelastungen an Bohr- oder Verdrängungspfählen

Lastwechselzahl n	Anpassungsfaktor η_Z
1	1,0
bis 100	0,8
bis 10000	0,7
≥ 1 Mio	0,4

Tabelle 6: Anpassungsfaktoren η_Z für Wechsel- bzw. Zugschwellbelastung auf Verpreßpfähle für Schwelllastanteile > 25 % von S_d

Der Anpassungsfaktor η_N für Verpreßpfähle beträgt unabhängig von der Anzahl der Probebelastungen $\eta_N = 1$.

Im Falle, daß bei Probebelastungen von Druckpfählen der GZ 1B aus der WSL nicht erkennbar ist oder erst bei Setzungen eintritt, die größer als

$$s_i = 0,1 \cdot D_F \tag{12}$$

sind, ist

$$R_{i,k} = R(0,1 \cdot D_F) \tag{13}$$

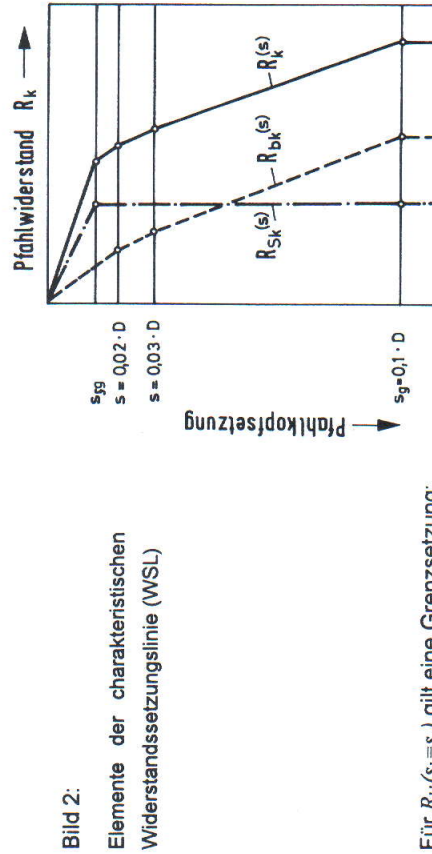
anzusetzen. D_F ist der Pfahldurchmesser.

3.3.3 Axiale Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten

Hier geht die DIN 1054 Teil 100 deutlich über den EC7 hinaus und gibt in den Anhängen D bis F konkrete Angaben auf der Grundlage der bisherigen Erfahrungswerten aus DIN 4014, DIN 4026 und DIN 4128, die nachfolgend auszugsweise mit den neuen Bezeichnungen wiedergegeben sind.

a) Bohrpfähle

In Bild 2 sind die Elemente der charakteristischen WSL bis zu einer Setzung von $s_I = s_g$ (Grenz-/Bruchsetzung) dargestellt. Es ist zu unterscheiden zwischen dem setzungsabhängigen Pfahlfußwiderstand $R_{fk}(s)$ und dem Mantelwiderstand $R_{sk}(s)$.



Für $R_{fk}(s_I = s_g)$ gilt eine Grenzsetzung:

$$s_g = 0,1 \cdot D \text{ bzw. } s_g = 0,1 \cdot D_F \tag{14}$$

mit D Pfahlschaftdurchmesser und D_F Pfahlfußdurchmesser. Für R_{fk} eingesetzt in MN im Bruchzustand gilt eine Grenzsetzung

$$s_g = 0,5 \cdot R_{fk} + 0,5 \leq 3 \text{ cm} \tag{15}$$

Der charakteristische axiale Pfahlwiderstand ist

$$R_{kf}(s) = R_{fk}(s) + R_{sk}(s) = q_{fk} \cdot A_b + \sum q_{kri} \cdot A_{si} \tag{16}$$

Bezeichnungen siehe unter Gleichung (7).

Bei der Ermittlung der charakteristischen axialen Widerstandshebungsline ist

Bei der Ermittlung der charakteristischen axialen Widerstandshebungsline ist

$$s_{g,avg} = 1,3 \cdot s_{sg} \tag{17}$$

mit s_{sg} nach Gleichung (15) ansetzen.

Die charakteristischen Pfahlfußwiderstandsspannungen (Pfählfußdruckspannungen) und Pfahlmantelreibungsspannungen für Bohrpfähle von $D = 0,3$ bis 3 m, die mindestens $2,5$ m in eine tragfähige Schicht einbinden sind in den Tabellen 7α und β dargestellt.

α) Pfahlspitzen- und Pfahlmantelreibungsspannung für nichtbindige Böden

bezogene Pfahlkopfsetzung s/D bzw. s/D_F	Pfählspitzen- und Pfahlmantelreibungsspannung q_{fk} bei einem mittleren Sondierwiderstand q_{sk} in MN/m^2				
	10	15	20	25	
0,02	0,7	1,05	1,4	1,75	
0,03	0,9	1,35	1,8	2,25	
$0,10 = s_g$	2,0	3,0	3,5	4,0	

*) Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden. Bei Bohrpfählen mit Fußverbreiterung sind die Werte auf 75% abzumindern.

Festigkeit des nichtbindigen Bodens bei einem mittleren Sondierwiderstand q_{sk} in MN/m^2	Bruchwert q_{fk} der Mantelreibungsspannung in MN/m^2 *)
0	0
5	0,04
10	0,08
≥ 15	0,12

*) Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

β) Pfahlspitzen- und Pfahlmantelreibungsspannung für bindige Böden

bezogene Pfahlkopfsetzung s/D bzw. s/D_F	Pfählspitzen- und Pfahlmantelreibungsspannung q_{fk} bei einer Kohäsion im undrained Zustand c_{uk} in MN/m^2				
	0,1	0,35	0,9	1,1	1,5
0,02	0,1	0,35	0,9	1,1	1,5
0,03	0,1	0,35	0,9	1,1	1,5
$0,10 = s_g$	0,1	0,35	0,9	1,1	1,5

*) Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden. Bei Bohrpfählen mit Fußverbreiterung sind die Werte auf 75% abzumindern.

Festigkeit des bindigen Bodens bei einer Kohäsion im undrained Zustand c_{uk} in MN/m^2	Bruchwert q_{fk} der Mantelreibungsspannung in MN/m^2 *)
0,025	0,025
0,1	0,04
$\geq 0,2$	0,06

*) Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

Tabelle 7: q_{fk} und q_{sk} aus Erfahrungswerten für Bohrpfähle

Die Anforderungen an den Untergrund sind in DIN 1054 Teil 100 definiert. Für Fels sind ebenfalls Angaben zur Tragfähigkeit vorhanden.

b) **Verdrängungspfähle**

Die beiden nachfolgend dargestellten Verfahren der Ermittlung von Pfahlwiderständen aus Erfahrungswerten beziehen sich für das Verfahren nach den Tabellen E.1 bis E.3 aus dem Anhang der DIN 1054 Teil 100 (hier beispielhaft für Stahlbetonfertiggpfähle in Tabelle 8 wiedergegeben) auf den Nachweis im GZ 2, wobei der Nachweis für den GZ 1B nicht erforderlich bzw. gleichzeitig mit abgedeckt ist. Das zweite Verfahren nach Tabelle 9 unter sinngemäßer Anwendung von Gleichung (16) bezieht sich auf den Nachweis in GZ 1B, wobei hier auf den Nachweis für den GZ 2 verzichtet werden darf. Die beiden Verfahren sollten innerhalb einer Berechnung nicht miteinander vermischt werden. Für beide Verfahren kann davon ausgegangen werden, daß in GZ 2 (Gebrauchstauglichkeit) Setzungen von 1 bis 2 cm eintreten können.

Einbindetiefe in den tragfähigen Boden m	R_{2k} in kN Seitenlänge a' ¹⁾ in cm			
	20	25	30	35
3	200	250	350	450
4	250	350	450	600
5	-	400	550	700
6	-	-	650	800

¹⁾ Gilt auch für annähernd quadratische Querschnitte, wobei für a' die mittlere Seitenlänge einzusetzen ist.

Tabelle 8: Charakteristische Pfahlwiderstände R_{2k} (GZ 2) von geramten Verdrängungspfählen mit quadratischem Querschnitt aus Stahlbeton

Der tragfähige Boden für die Anwendung von Tabelle 8 ist in DIN 1054 Teil 100 definiert

Die Anforderungen an den nichtbindigen Untergrund für die Anwendung der nachfolgend dargestellten Tabelle 9 sind Drucksondierergebnisse $q_{sk} \approx 7,5 \text{ MN/m}^2$ für die unteren Tabellenwerte und $q_{sk} \approx 15 \text{ MN/m}^2$ für die oberen Tabellenwerte. Der bindige Untergrund ist nach Tabelle 9 über die Konsistenzbeschreibung I_c nachzuweisen.

Bodenart	Bereich unter OK der tragfähigen Schicht in m	mittlere Mantelreibungsspannungen (für abgewinkelten Umfang) $q_{s,k}$ in kN/m ²				Pfahlspitzenpressspannungen (umrissener Umfang des Pfahlfußes) $q_{t,k}$ in MN/m ²			
		Holzpfähle	Stahlbetonpfähle	Stahlrohrpfähle	Kastenpfähle	Holzpfähle	Stahlbetonpfähle	Stahlrohrpfähle	Stahlträgerpfähle
nichtbindige Böden	bis 5 5-10 > 10	20-45 40-65 60	20-45 40-65 60	20-35 35-55 50-75	20-30 30-50 40-75	2-3,5 3,5-6,5 3-7,5	2-5 3,5-6,5 4-8	1,5-4 3-6 3,5-7,5	1,5-3 2,5-5 3-6
¹⁾ $I_c = 0,5 - 0,75$		5-20				0-2			
²⁾ $I_c = 0,75 - 1$		20-45				0-2			
Geschiebbemerkel halbfest bis fest ³⁾	bis 5 5-10 > 10	50-80 80-100	40-70 60-90 80-100	30-50 40-70 50-80	2-6 5-9 8-10	2-6 5-9 8-10	1,5-5 4-9 8-10	1,5-4 3-7,5 6-9	

¹⁾ Für Kastenweiten oder Rohrdurchmesser $\leq 500 \text{ mm}$
²⁾ Für Profilweiten $\leq 350 \text{ mm}$; bei höheren Profilen Stege einschweißen
³⁾ Für Stahlkastenpfähle mit geschlossenem Fuß siehe Stahlbetonpfähle
 Für Geschiebbemerkel kann i.d.R. die Konsistenzzahl I_c wegen zu hohem Überkoranteils nicht mehr nach DIN 18122 bestimmt werden und ist auf der Grundlage örtlicher Erfahrungen einzuschätzen.
⁴⁾ I_c nach DIN 18122

Tabelle 9: Charakteristische Pfahlspitzenpressspannungen $q_{t,k}$ und Pfahlmantelreibungsspannung $q_{s,k}$ für den GZ 1B

c) **Verpreßpfähle**

Für Verpreßpfähle enthält DIN 1054 Teil 100 für den Ausnahmefall, daß keine Pfahlprobebelastungen ausgeführt werden, charakteristische Pfahlmantelreibungsspannungen $q_{s,k}$.

3.3.4 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit GZ 2

Eine ausreichende Sicherheit gegen Verlust der Gebrauchstauglichkeit (GZ 2) wird eingehalten, wenn die Bedingung

$$R_{2d} - S_{2d} \geq 0 \tag{18}$$

mit

$$R_{2d} = R_{2k} \tag{19}$$

erfüllt ist. Zum Bemessungswert der Einwirkungen S_k , siehe Abschn. 2.2.

Der Nachweis im GZ 2 ist nur zu führen, wenn die Verformungen der Pfahlgründung für das Gesamttragwerk von Bedeutung sind.

Der Bemessungswert der Widerstände R_{2k} ergibt sich entsprechend Gleichung (19) unmittelbar aus dem charakteristischen Wert der Widerstände R_{2k} . Der charakteristische Wert R_{2k} des axial belasteten Einzelfahles ist unter Berücksichtigung bzw. Vorgabe einer charakteristischen Setzung s_{2k} oder unter Vorgabe eines charakteristischen Widerstandes R_{2k} mit einer zugehörigen Streuung s_{2k} der Setzungen aus der charakteristischen WSL aus Probebelastungen oder mit Erfahrungswerten zu bestimmen.

3.4 Vergleichende Berechnungsbeispiele

3.4.1 Einwirkungskombinationen und Berechnungsgrundlagen

Für die folgenden Berechnungsbeispiele wurden 2 Einwirkungskombinationen zugrunde gelegt:

- a) Nur ständige Einwirkungen G mit $S_k = G_k$
- b) Ständige Einwirkungen G und veränderliche Einwirkungen Q (nicht zu wechseln mit der Pfahllast Q nach altem Konzept, nachfolgend zur Q_{alt} genannt) mit jeweils 50 % Anteilen an der Gesamteinwirkung; es gilt $S_k = G_k + Q_k$.

Alle Berechnungsbeispiele beziehen sich nur auf die „äußere Pfahltragfähigkeit“ für den GZ 1. Ausgewiesen wurde im Vergleich zur bisher üblichen Vorgehensweise

$$S_k = \text{zul } Q_{alt} \quad (20)$$

Mit a) und b) ergeben sich folgende Beziehungen.

- c) Für Bohrpfähle und Verdrängungspfähle nach DIN 1054 Teil 100 (GZ 1B):

$$S_k = G_k; \quad 1,35 S_k = R_{1k}/1,4 \Rightarrow S_k = R_{1k}/(1,4 \cdot 1,35)$$

$$S_k = G_k + Q_k; \quad 1,35 G_k + 1,5 Q_k = R_{1k}/1,4 \Rightarrow S_k = R_{1k}/(1,4 \cdot 1,425)$$

- d) Für Bohrpfähle und Verdrängungspfähle nach EC 7 (Fall 1C):

$R_{ek} = R_{bk} + R_{2k}$ ist vorab durch 1,5 (1 Probebelastung oder Erfahrungswerte) zu dividieren;

$$S_k = G_k; \quad 1,0 S_k = R_{bk}/(1,6 \cdot 1,5) + R_{2k}/(1,3 \cdot 1,5) = R_{cd} \Rightarrow S_k = F_{cd} = R_{cd}$$

$$S_k = G_k + Q_k; \quad 1,0 G_k + 1,3 Q_k = R_{bk}/(1,6 \cdot 1,5) + R_{2k}/(1,3 \cdot 1,5) = R_{cd} \Rightarrow S_k = R_{cd}/1,15$$

Für Verdrängungspfähle ist in vorstehenden Gleichungen γ_s mit 1,3 statt 1,6 einzuführen.

3.4.2 Pfahltragfähigkeiten auf der Grundlage von Erfahrungswerten

- a) **Bohrpfähle:** $D = 0,4 \text{ m}$ und $D = 0,9 \text{ m}$; $q_{ek} = 10 \text{ MN/m}^2$ (nichtbindiger Boden)

$$\Rightarrow q_{1sk} = 2,0 \text{ MN/m}^2; \quad q_{1sk} = 0,08 \text{ MN/m}^2$$

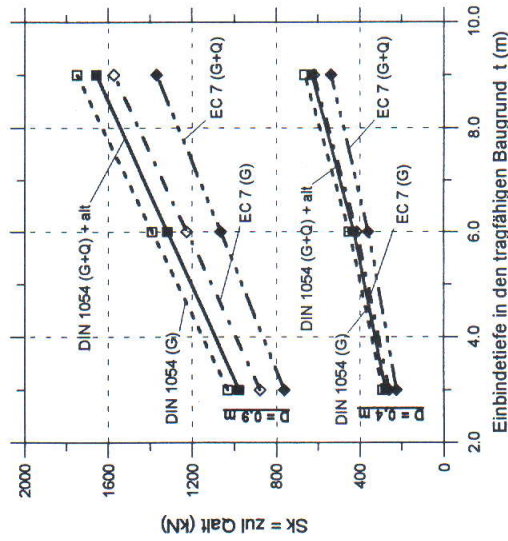


Bild 3: Vergleichende Berechnungsergebnisse für Bohrpfähle auf der Grundlage von Pfahlwiderständen aus Erfahrungswerten

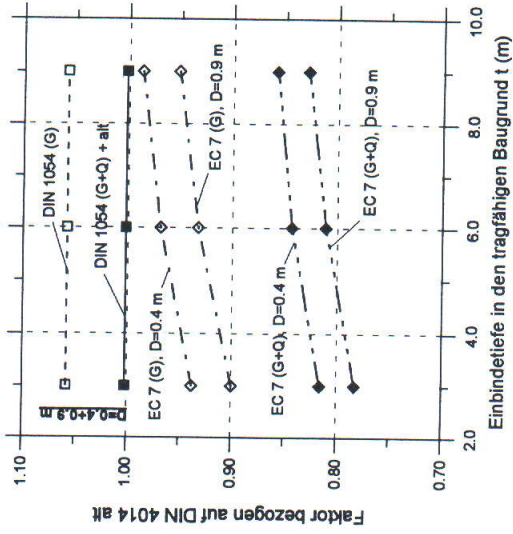


Bild 4: Vergleich der Berechnungsergebnisse für Bohrpfähle nach EC 7 und DIN 1054 Teil 100 bezogen auf die bisherigen Regelungen in DIN 4014 alt

b) Verdrängungspfähle: $a = 0,35 \text{ m}$; $q_{ak} = 10 \text{ MN/m}^2$ (nichtbindiger Boden)

Grundlage der Berechnungen sind die Tabellenwerte 8 und 9. Nach Tabelle 9 wurden folgende Werte gewählt:

$t = 3 \text{ m}$	$q_{1sk} = 3,0 \text{ MN/m}^2$	$q_{1sk} = 0,06 \text{ MN/m}^2$
$t = 4 \text{ m}$	$q_{1sk} = 3,0 \text{ MN/m}^2$	$q_{1sk} = 0,06 \text{ MN/m}^2$
$t = 5 \text{ m}$	$q_{1sk} = 3,75 \text{ MN/m}^2$	$q_{1sk} = 0,06 \text{ MN/m}^2$
$t = 6 \text{ m}$	$q_{1sk} = 4,5 \text{ MN/m}^2$	$q_{1sk} = 0,06 \text{ MN/m}^2$

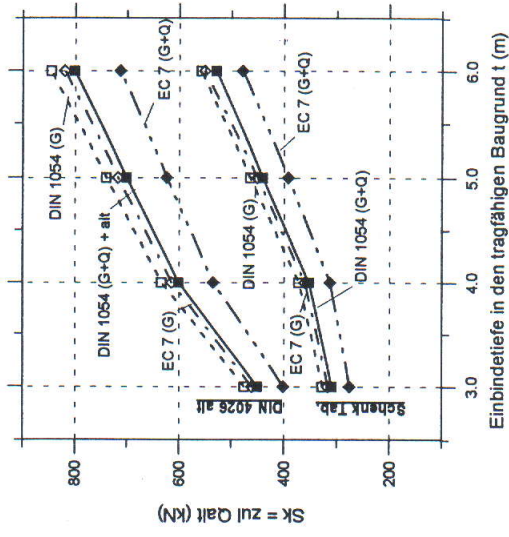


Bild 5: Vergleichende Berechnungsergebnisse für Verdrängungspfähle auf der Grundlage von Pahlwiderständen aus Erfahrungswerten

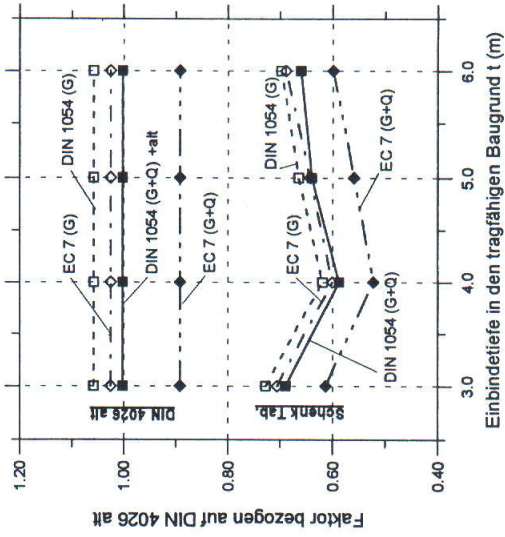
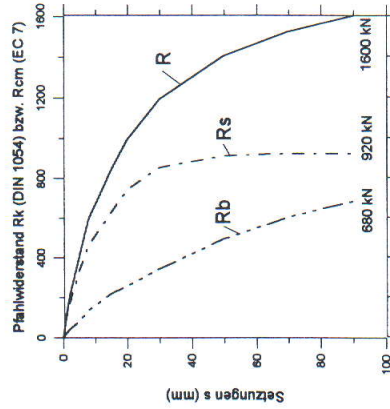


Bild 6: Vergleich der Berechnungsergebnisse für Verdrängungspfähle nach EC 7 und DIN 1054 Teil 100 bezogen auf die bisherigen Regelungen in DIN 4026 alt mit globalen Tragfähigkeitstabellen

3.4.3 Pfahltragfähigkeiten auf der Grundlage von statischen Probebelastungen

Für die Beispielerrechnungen nach Bild 7a wurde ein Probebelastungsergebnis an einem Bohrpfahl mit $D = 0,9 \text{ m}$ in Anlehnung an (KEMPFFERT/LAUFFER, 1991) gewählt. Des Weiteren wurde fiktiv in Bild 7b die WSL aus Bild 7a auf 80 % reduziert und gleichzeitig R_{bk} konstant gehalten. Damit wurde ein geringerer R_{sk} -Anteil an der Gesamttragfähigkeit erreicht.

a) Beispiel 1



b) Beispiel 2

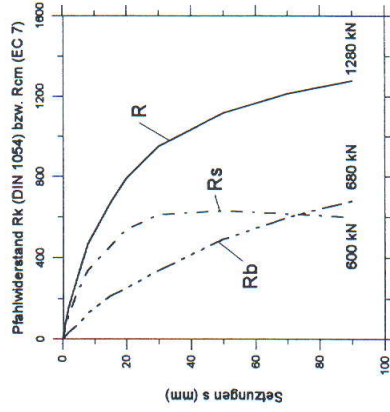


Bild 7: WSL aus Bohrpfahlprobebelastungen, a) Beispiel 1 mit $R_{bk}/R_{sk} = 0,74$, b) Beispiel 2 mit $R_{bk}/R_{sk} = 1,13$

Mit den Darstellungen in Abschn. 3.4.1 sind die Pfahltragfähigkeiten für den GZ 1 für eine vergleichende Bewertung nach Gleichung (20) mit den Fällen in Abschn. 3.4.1 a) bis d) in Tabelle 10 gegenübergestellt

4 PFAHLWIDERSTÄNDE QUER ZUR PFAHLACHSE

Für diese Beanspruchungsform wird in EC7 ebenfalls unterschieden zwischen Tragfähigkeitsnachweisen auf der Grundlage von Probebelastungen und Ergebnissen von „Baugrunderkundungen und Pfahlfestigkeitsparametern“. Wie im einzelnen zu verfahren ist, darüber sind im EC7 nur sehr allgemeine Hinweise zu finden.

DIN 1054 Teil 100 gibt zur Widerstandsermittlung quer zur Pfahlachse im wesentlichen die bisherigen nationalen Erkenntnisse zur Bettungsmodulermittlung an. Dies gilt auch für die Bettungsmodulverteilung in der Pfahlgruppe (bisher in DIN 4014), die in den Anhang zur DIN 1054 mit aufgenommen wurde. Ein besonderes Problem wird noch gesehen in dem Nachweis GZ 1B (Bauteilversagen), wobei die Pfahlschnittgrößen einerseits mit den γ -fachen Einwirkungen und andererseits mit Bettungsmodul als Bodenwiderstände berechnet werden müssen. Dafür wird vorerst

$$k_{sd} = k_{sk} \quad (21)$$

festgelegt. Endgültige Regelungen soll der Ausschuß Boden-Bauwerk-Wechselbeziehung erarbeiten.

5 BEWERTUNG UND AUSBLICK

Die probeweise Anwendung von ENV 1997-1 (EC 7) für die Ermittlung von Pfahltragfähigkeiten ist unter Berücksichtigung des nationalen Anwendungsdokuments (NAD) mit den Vorgaben der DIN 1054 Teil 100 möglich. Die in Abschn. 3.4 dargestellten Vergleichsberechnungen zeigen, daß die DIN 1054 Teil 100 etwa das bisher in Deutschland übliche Sicherheitsniveau einhält, die Vorgehensweise nach EC 7 ergibt bis zu etwa 25 % niedrigere axiale Pfahltragfähigkeiten und damit ein insgesamt höheres Sicherheitsniveau aber unwirtschaftlichere Konstruktionen. Der Vorteil von DIN 1054 Teil 100 liegt besonders in der Angabe von konkreten Erfahrungswerten für die Pfahltragfähigkeit, die den nationalen Erfahrungsstand sichern sowie die insgesamt vertrauere Art der Bemessungsvorgaben.

Tabelle 10: Vergleichende Berechnungsergebnisse für Bohrfähle aus Probebelastungsergebnissen nach Bild 7 sowie Darstellung der Ergebnisse mit dem Faktor $F_{ait} = (EC 7 \text{ bzw. } DIN 1054-100) / DIN 4014ait$

Einwirkungsart und Beispiel-Nr.	EC 7 $S_k = \text{zul } Q_{ait} \text{ [kN]}$	EC 7 F_{ait}	DIN 1054-100 $S_k = \text{zul } Q_{ait} \text{ [kN]}$	DIN-1054 F_{ait}
Beispiel 1: $S_k = G_k$ $S_k = G_k + Q_k$ (jeweils 50 %)	755,1 636,6	0,944 0,821	846,6 802,0	1,058 1,003
Beispiel 2: $S_k = G_k$ $S_k = G_k + Q_k$ (jeweils 50 %)	591,0 513,9	0,923 0,803	677,2 641,6	1,058 1,003

Zu erwähnen sind aber auch die immer noch vorliegenden erheblichen Differenzen zwischen den in DIN 1054 Teil 100 übernommenen Pfahltragfähigkeitstabellen für Verdrängungspfähle aus DIN 4026 und den ebenfalls übernommenen Tabellenwerten nach (SCHENK, 1960) für Pfahlmantel- und Pfahlspitzendruckspannungen. Letztere ergeben deutlich niedrigere Pfahltragfähigkeiten.

Sowohl in EC 7 als auch DIN 1054 Teil 100 besteht noch ein Regelungsbedarf für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit von Pfahlgründungen bzw. die im Zusammenhang mit dem Nachweis „Bruch im Bauwerk“ stehenden Fragen zur Boden-Bauwerks-Wechselbeziehung.

Besonders dringlich sind weitere Vergleichsberechnungen auch für extreme Lastkombinationen, um die Vertrauensbasis der neuen Regelungen zu festigen, aber auch weiter abgesicherte Grundlagen für die endgültigen europäischen Festlegungen zu erhalten.

6 LITERATUR

- ENV 1991-1 (EC1): Basis of Design and Actions on Structures, Part 1: Basis of Design
- ENV 1997-1 (EC7): Geotechnical Design. Part. 1: General Rules
- FRANKE, E.: Verbesserung der Genauigkeit der Tragfähigkeitsangaben für Ramm- bzw. Verdrängungspfähle im Zuge der Neubearbeitung der DIN 4026 unter Berücksichtigung von EC7. Forschungsber. im Auftrag des Instituts für Bautechnik. TH Darmstadt 1991
- KEMPFERT, H.-G./ Pfallprobebelastungen in wenig tragfähigen Böden unter statischer und wechselnder Belastung. Geotechnik 1991, H. 3, S. 105-112
- LAUFFER, J.: Abstimmung der ENV 1991-1 und ENV 1997-1. Geotechnik 1994/1, S. 36-43
- SMOLTZYK, U.: Abschnitt „Pfahlgründungen“ im Grundbautaschenbuch, 2. Aufl., Ernst & Sohn, Berlin 1966.